南京大学65cm反射式望远镜CCD相机的性能研究

何秋会[1] 杨天宁[2] 王旭[1]

（1.南京大学 天文与空间科学学院，南京 210046；2.南京大学 匡亚明学院，南京 210046）

摘 要：2021年6月，使用南京大学本科实验教学的65cm反射式望远镜系统，对其后端的探测器--电荷耦合器件（Charge-Coupled Device，简称CCD）系统的性能采用圆顶平场法进行了实际测定，得到了CCD相机的快门函数；同时用平场序列曝光，检测了CCD相机的线性，结果为：CCD相机的读出值从0到61900模数转换单位（Analog-Digital Unit，简称adu），非线性小于1%，同时CCD相机的增益为 1.02e⁻/adu，读出噪音为13 e⁻。但对于恒星这样的点光源的观测，当像元的数值高于38000 adu时，会产生溢出。因此，在使用本CCD相机做点光源（例如恒星）观测研究时，需要选择恰当的曝光时间，避免星像发生溢出。实际天文观测中，利用此研究得到的快门函数，可对观测图像进行校准，有效提高测光精度。

关键词：CCD；快门函数；线性；探测器；天文望远镜

中图分类号：P123.1 **文献标识码：**

基金项目：国家自然科学基金(11873030, 12041306)；中华人民共和国科学技术部SKA专项基金(2020SKA0120300)资助

收稿日期：

作者简介：何秋会，女，工程师，硕士，主要从事天文观测及天文实验教学，qhhe@nju.edu.cn。

Performance of the CCD Camera On the 65cm Reflective Telescope at Nanjing University

HE Qiuhui[1], YANG Tianning[2], WANG xu[1]

（1.School of Astronomy & Space Science, Nanjing University, Nanjing 210046, China ; 2.Kuang Yaming Honors School, Nanjing University, Nanjing 210046, China）

Abstract: We have determined the capability of the CCD system by the dome flat field method on the backend of the 65cm reflective telescope at the Zuodijiang Observatory of Nanjing University, and have obtained its shutter function. The response linearity of CCD camera has also been tested by the flat field exposure series. The results show that nonlinearity of the readout value is less than 1% from 0 to 61900ADU, and the gain of CCD camera is about 1.02 e^-/ADU, and the readout noise is about 13 e^-. However, overflow has occurred when the readout value is above 38,000 ADU for point-source observation. Therefore, proper exposure time is needed to avoid star image overflow when using this camera for point source observation. In the future observation, this shutter function could be used to calibrate the image in order to improve the photometric accuracy.

Key Words: CCD；Shutter function；Linearity；Detectors；Astronomical telescope；

天文学是一门观测与理论研究紧密联系的学科，也是现代科学与高新技术完美结合的典范。天文学的发展离不开天文望远镜，现代的天文望远镜离不开探测器。1609 年伽利略发明了天文望远镜[1]，之后的 200 多年，天文学家都是依靠望远镜和肉眼来进行天文观测，并通过观察或素描来记录他们的发现[2]。1839 年美国化学家约翰的·雷柏首次用照相机拍摄了月亮的照片，从此照相技术开始用于天文观测，天文测光技术也逐渐建立起来。20 世纪后，随着电子技术的发展，人们开始把光信号转化成电信号，天文观测探测器逐步出现了光电器件，如光电倍增管，天文观测进入了光电测光时代[3]。底片照相的优点是探测面积大，并且可以长时间曝光，缺点是响应的非线性。光电测光的优点是高灵敏度而且线性，但探测面积小。1969 年美国贝尔实验室发明了 CCD，它兼有底片照相和光电测光的优点。1975 年科学级 CCD 相机应用于天文望远镜进行观测，很快在天文学的光学波段观测中被广泛应用，从而彻底改变了天文学的观测方法。20 世纪 90 年代，光学天文探测器基本完全由科学级 CCD 探测器代替。

科学级 CCD 相机在天文上的广泛应用，不仅因为 CCD 相机可以得到数字化的图像[4]，还因为科学级 CCD 相机的高灵敏、低噪声、极好线性和大动态范围等良好性能[3]。这些性能使科学级 CCD 相机能探测到更暗弱的天体。科学级 CCD 相机性能虽然良好，但在实际使用时，会随着环境改变或使用年限等因素变化而变化。当购置 CCD 相机时，生产厂家会提供部分性能参数，但按照惯例，生产厂家并不提供 CCD 相机各个像元的快门或线性等性能参数。在观测亮天体时，

让 CCD 相机短时间曝光进行图像采集，需考虑 CCD 相机快门性能对测光精度的影响，所以天文观测工作者必须自己对 CCD 相机的性能参数进行测定[5,6]。本文作者对南京大学 65cm 天文望远镜使用的探测器 PIXIS 2048B CCD 相机进行了一些特性测定，分析了它的快门函数和线性，以便于做精细测光时进行必要修正。

本文第一节简单介绍快门函数和线性的测定方法，第二节介绍观测情况及观测结果，第三节对观测结果进行讨论，第四节对本文的工作进行总结。

1 CCD 的线性和快门函数

1.1 快门函数

天文 CCD 相机系统中要求有快门功能。由于相机快门的动作独立于光学系统，所以在光学系统对光通量控制的基础上，相机快门进一步增强了对信号电荷量控制的灵活性[7]。 天文 CCD 相机的快门有光瞳式和帘幕式两种类型，PIXIS 2048B CCD 相机使用的是光瞳式。光瞳式CCD相机在曝光开始后，相机快门在CCD靶面中心最先打开，曝光结束时相机快门在 CCD 靶面中心最后关闭， 因此 CCD 靶面中心像元的实际曝光时长与边角的实际曝光时长是不相同的。其次相机快门的开关速度有限，当使用 CCD 相机做短时间曝光进行图像采集，快门效应会很明显。对于观测比较亮的天体目标，图像采集时一般只能进行短时间曝光，因此必须对使用的 CCD 相机的快门进行测定，了解其响应大小，然后进行必要的修正。

测定快门修正的方法有 P.B.Stetson 提出的圆顶平场法和 P.Surma 提出的晨昏蒙影天光平场法[8]。其中圆顶平场法不要求定平场函数而只要求定快门函数，此方法简单准确，只需要光源稳定即可[9]，因此本文使用该方法进行快门函数的测定。

快门函数的修正首先需要测定快门函数，快门函数的获得类似于平场修正的获得：假设 CCD 第 i 列第 j 行的像元，其响应系数为 a(i , j)，稳定的圆顶平场灯光照射到此像元的光强为 L(i , j)，取 CCD 相机长短不同的两个积分时间 t_1 和 t_2，测量该像元的实际输出为 I(i , j) t_1 和 I(i , j) t_2，则有

$$I_1 \equiv I(i,j)\cdot t_1 = a(i,j)\cdot L(i,j)\cdot (t_1 + \Delta(i,j)) \qquad (1)$$

$$I_2 \equiv I(i,j)\cdot t_2 = a(i,j)\cdot L(i,j)\cdot (t_2 + \Delta(i,j)) \qquad (2)$$

其中，快门函数 Δ(i , j)（对 PIXIS 2048B CCD，i=1,..,2048; j=1,..,2048，(i , j)为 CCD 第 i 列第 j 行像元）是由于相机快门影响导致的延迟时间，即拍摄程序设置的积分时间 t 与真实的积分时间 T(i , j)的差值。因为 a(i , j)和 L(i , j)不变化，可消除它们的影响，(1)、(2)两式相除有

$$I_1/I_2 = (t_1 + \Delta(i,j)) \,/\, (t_2 + \Delta(i,j)) \qquad (3)$$

整理可得快门函数

$$\Delta(i,j) = (I_2\cdot t_1 - I_1\cdot t_2) \,/\, (I_1 - I_2) \qquad (4)$$

所以第 i 列第 j 行像元真实的曝光时间为

$$T(i,j) = t + \Delta(i,j) \qquad (5)$$

1.2 线性

CCD的线性是动态范围内入射光强变化与CCD响应变化之间的线性程度。一般用代表CCD相机产生的电信号与入射光强之间的线性关系的线性度来表征线性的好坏。在典型的视频或TV应用中，人们并不十分关心CCD相机的线性度，甚至高达20%的偏差都是允许的[10]。然而，在成像科学研究领域里，响应的线性度是必须考虑的重要参数。理想的情况是：每一个像元都可作为一个高保真的光子测量器件，它产生的电信号与入射光的强度成精确的正比。因此，保证CCD相机的线性度对于成像科学在定量研究中的应用十分重要。一个高性能的科学级CCD相机的非线性度在整个动态范围内甚至要小于0.1%[8]，同时像元与像元之间具有很好的响应均匀性。

CCD相机的线性是衡量天文探测器的一个重要指标，线性不好意味着观测得到的图像会失真，从而难以进行信息处理。本文采用的线性的测量方法是：通过拍摄一系列不同曝光时间t_i的平场图像，获取像元的响应数值V_{ti}即测量值；然后对V_{ti}与t_i进行线性函数拟合，得到线性函数；计算测量值V_{ti}与t_i时线性函数值V'_{ti}之间的差值，此差值是测量值与对应的线性值的偏离值，此偏离值的百分比即为我们求得的非线性度：

$$\mathrm{NL}=\frac{V_{ti}-V'_{ti}}{V'_{ti}}\times 100\% \tag{6}$$

根据不同数据的处理对精度的不同要求，可以在NL大于一定值的区域范围，才认为是非线性区域。

2 观测情况及观测结果

2.1 观测情况

南京大学天文与空间科学学院本科教学中心实验室在左涤江天文台（地理位置：东经 118°57′34″，北纬 32°07′45″）拥有一架 65cm 口径的天文光学望远镜，该望远镜使用的探测器是型号为 PIXIS 2048B 的一款 CCD 相机。这款 CCD 相机主要用于南京大学本科实验课程教学的实验观测。实验观测项目有大气消光、像元比例尺、变星较差测光等。实验观测项目的主要目的是训练天文本科学生的观测能力以及数据处理能力，最初对实验结果的精度要求不高，CCD 相机快门和线性对实验项目的影响归算在了实验误差分析之中。但是，随着实验教学质量提升计划的实施、研究生参与观测项目的增多以及和外单位合作的联合观测项目的开展，实验观测项目对观测精度的要求也逐步提高。为了在观测时更好地了解 CCD 相机性能，确定在精准测光时合适的曝光时间，必须对 CCD 相机的参数有详细的了解。

2021 年 5-6 月，通过使用望远镜室内的平场灯先对快门函数进行了测定。测定时，选择了 CCD 最灵敏的 I 滤光片，曝光时间为一短一长，短的为 1s，长的为 10s。CCD 采集的图像最大值为 65535 adu，1s 曝光的图像减去本底后的值为 5000 adu 左右；10s 曝光的图像减去本底后的值为 50000 adu 左右。测定快门函数的拍摄顺序为：1s 曝光连续拍摄了 5 幅，10s 曝光连续拍摄了 2 幅，1s 曝光连续再拍摄 5 幅。在快门函数测定拍摄前后各拍摄了 10 幅本底图像，用作处理曝光拍摄的图像和检查 CCD 状态是否稳定。在整个测定过程，保持了 CCD 相机制冷后温度稳定和平场灯照度稳定。

同时，对 CCD 相机的线性进行了测定。使用经过光学设计的出射光较为均匀的平场灯做平场拍摄。为了等待光源趋于稳定，在开灯半小时后才开始拍摄，在刚开始拍摄时，每隔几分钟拍一幅平场图像，当场计算图像的平均值，数值基本不变了才正式开始采集。在进行平场图像采集时，CCD 相机的曝光序列分为图像采集序列和监测采集序列，如表 1，监测采集序列穿插在图像采集序列之中。根据测得的快门函数，本文作者观测时选择的最低曝光时间从 5 s 开始，直到 180 s 饱和。CCD 相机的曝光序列的曝光时间为：10s；5s；10s；15s；10s；20s；10s；25s；10s；30s；10s；35s；10s；40s；10s；45s；....；10s；180s，其中穿插的 10 秒曝光为监测曝光，所以测定线性的图像采集序列的时间为：5 s；10s；15s；20s；25s；30s；35s；40s；45s；....；180s。穿插 10 秒曝光是因为如果光源亮度不稳定，光源亮度会慢慢漂移，为了减小光源不稳定带来的影响，所以中间不断加拍监测图像以监视亮度变化。

表 1　CCD 图像采集的曝光时间顺序

Table 1 Exposure time sequence of CCD imaging

曝光序列	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	...	69	70
图像采集序列时间(秒)		5		15		20		25		30	...		180
监测采集序列时间(秒)	10		10		10		10		10		...	10	

通过对观测数据的处理，得到了快门函数、线性、增益和读出噪声。

2.2 观测结果

2.2.1 快门函数

对观测得到的数据，我们使用通用的 IRAF 软件[11]对其进行了处理，得到了相机的快门函数 SHUTTER.fits 和快门函数的等光图如图 2（其中不同的闭合曲线代表了不同的快门修正值）。根据处理得到的 CCD 相机快门函数，可得知快门中心处极大值约为 0.04 秒，边缘极小值约 0.006 秒，CCD 相机的中心与边缘曝光时间相差约 0.04 秒。因此根据测量的快门函数的结果，若需要整个图像的测光精度差异小于 1%，设置的曝光时间则需大于 4 秒；若需要整个图像的测光精度差异小于 0.1%，设置的曝光时间则需大于 40 秒。

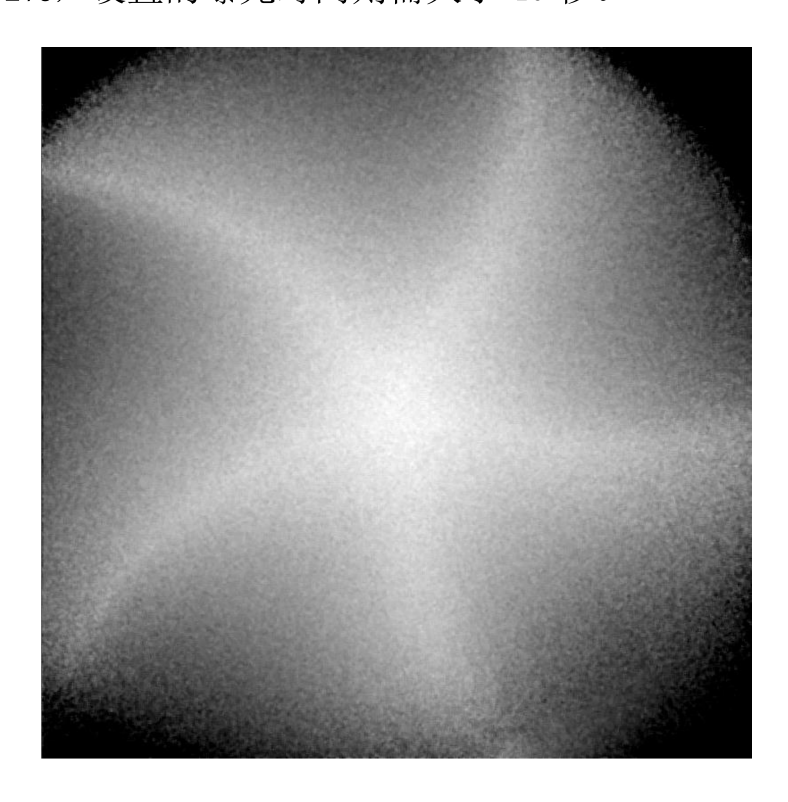


图 1　相机快门函数示意图

Fig.1 diagram of the shutter function

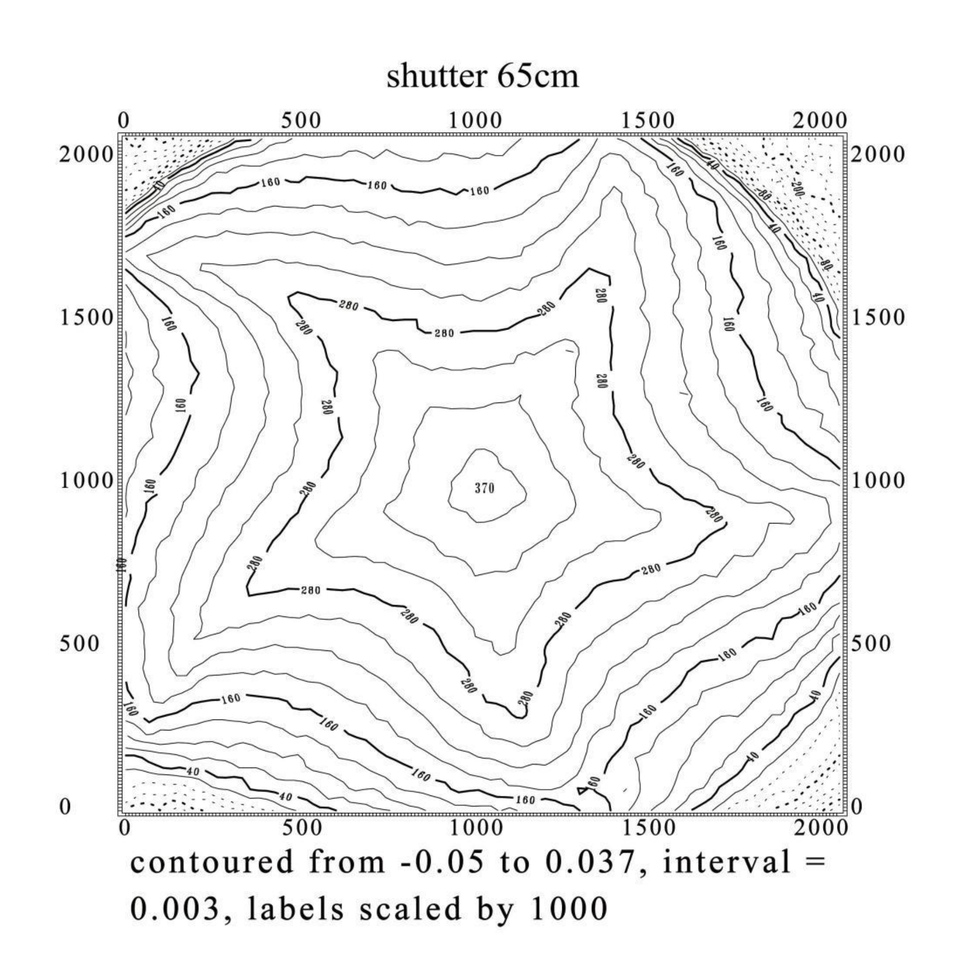


图 2　相机快门函数的等光图

Fig.2 contour of the shutter function

图 1 快门函数示意图和图 2 快门函数等光图都只是示意图，它们可以用来半定量地判断 CCD 上有关区域的快门影响大小。为了定量地修正快门效应，还需要做图像处理[12]。在实际观测的修正中，‘SHUTTER’表示快门函数，对于观测目标进行曝光 t 时间得到的星像图像，先减去 CCD 本底‘BIAS’，再做平场处理后，得到的星像图像

表示为‘IMAGE’，使用任何图像处理软件，例如 IRAF，进行图像运算处理：

$$IMAGE0 = [IMAGE/(SHUTTER + t)] \cdot t \tag{7}$$

这样就得到了修正过快门效应的所需图像‘IMAGE0’。

快门函数测定后，可以使用一段时间，但长时间多次反复开关快门，可能引起快门的机件老化，需要定期重新检测。

2.2.2 线性

通过对观测数据的处理，得到 CCD 的线性情况，如图 3 和图 4。图 3 是 CCD 的线性实测值和拟合曲线，图 4 是测量值偏离线性值的百

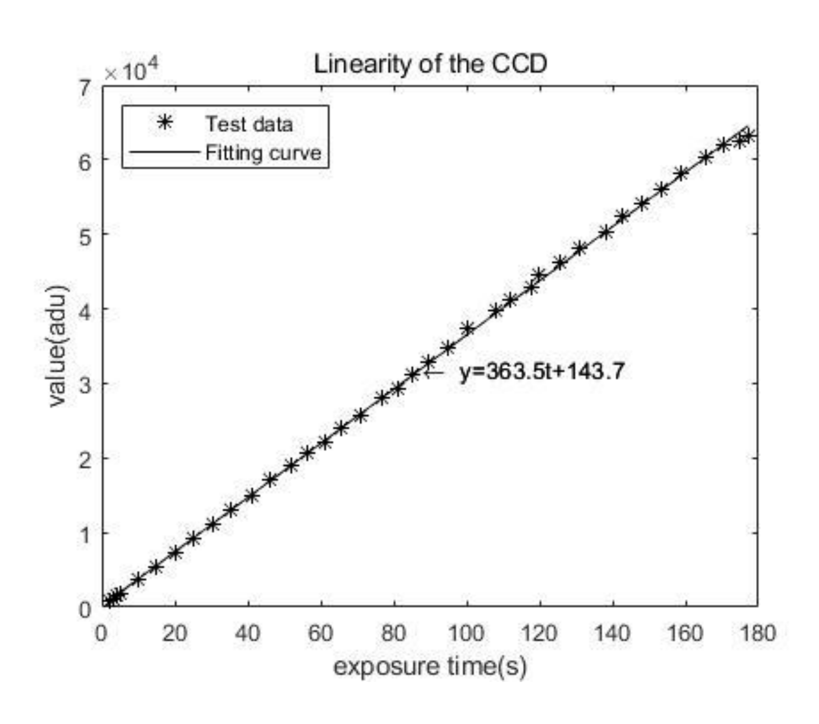


图 3　CCD 的线性实测值和拟合曲线

Fig.3　experimental value and fit curve of the CCD linearity

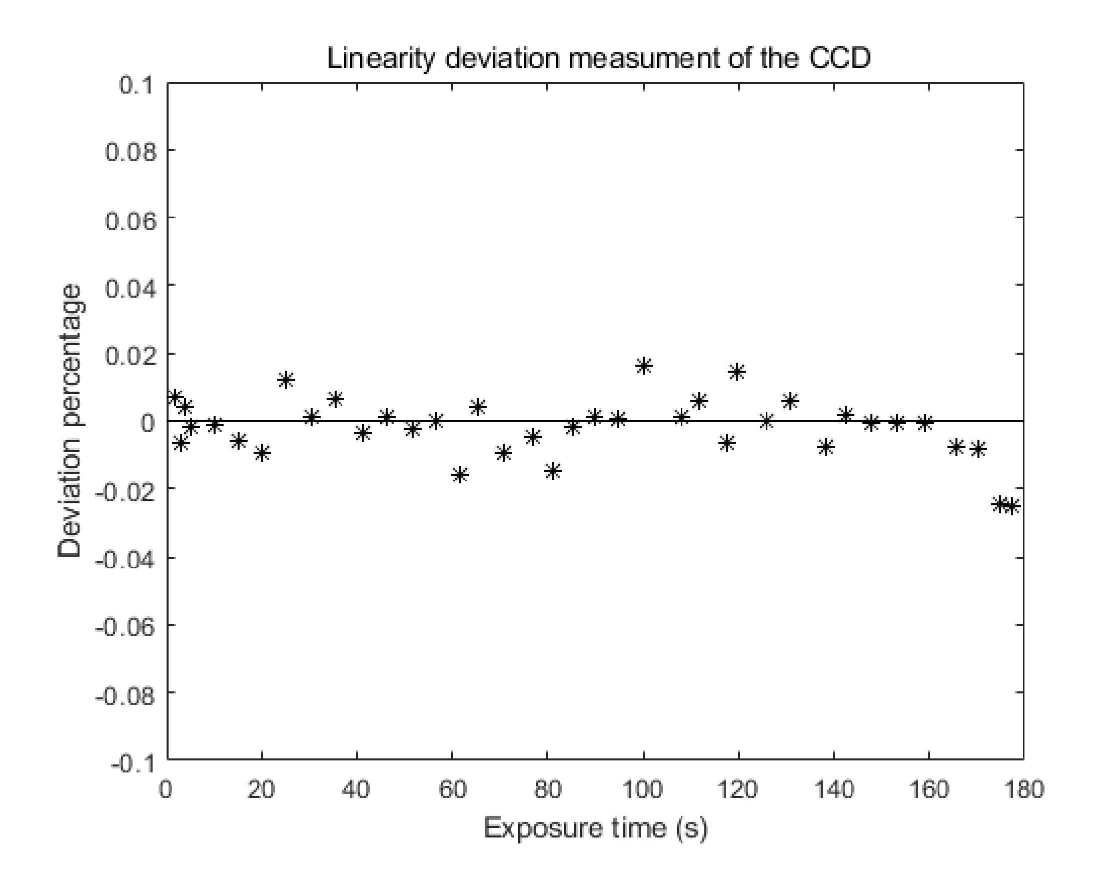


图 4 **测量值偏离线性的百分比**

Fig.4 Linearity deviation measument of the CCD

分比。从处理的数据可以清晰地得到 CCD 的线性：实验使用的 PIXIS 2048B CCD 相机的动态范围是 0 到 65535 adu，测试结果显示一直到 61900 adu，CCD 的非线性都小于 1%。需要说明的是：图 3 和图 4 是对面光源（圆顶平场）的线性测定，虽然直到 61900adu 还保持线性，但是对于点光源（恒星）的拍摄，情况却有所不同。在 2021 年的 1 月到 5 月，多次对巨蟹座中的一个疏散星团 M67 进行了观测。以 M67 中的一颗亮星 HD75700（08:51:49 +11:53:38）为例，曝光 5 秒得到图像，经过 IRAF 处理得这颗亮星的面亮度分布图(surface)如图 5 和该星的径向轮廓图(radial profile)如图 6。由图 5 和图 6 可见，

在约 38000adu 时，星像已经饱和，所以曝光后图像数值大于 38000 adu 的图像部分是不能使用的。

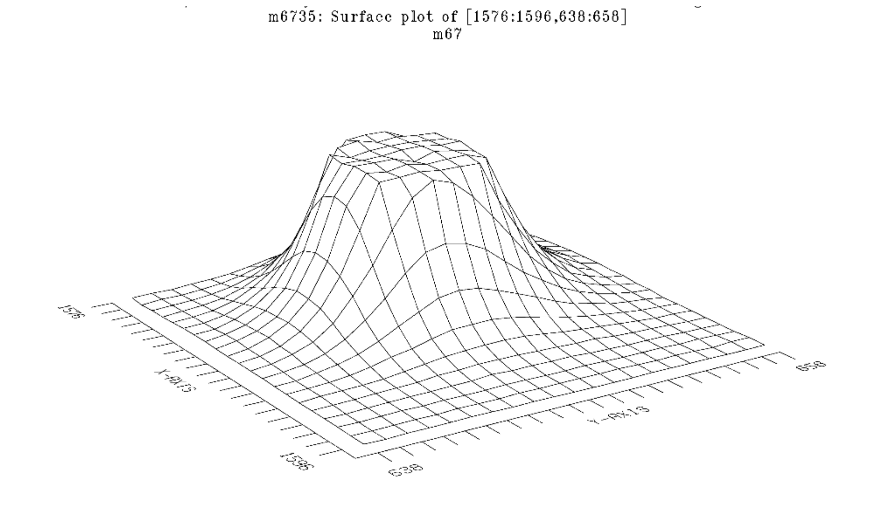


图 5　拍摄的 HD75700 的面亮度分布图

Fig.5　surface brightness profile of the observed HD75700

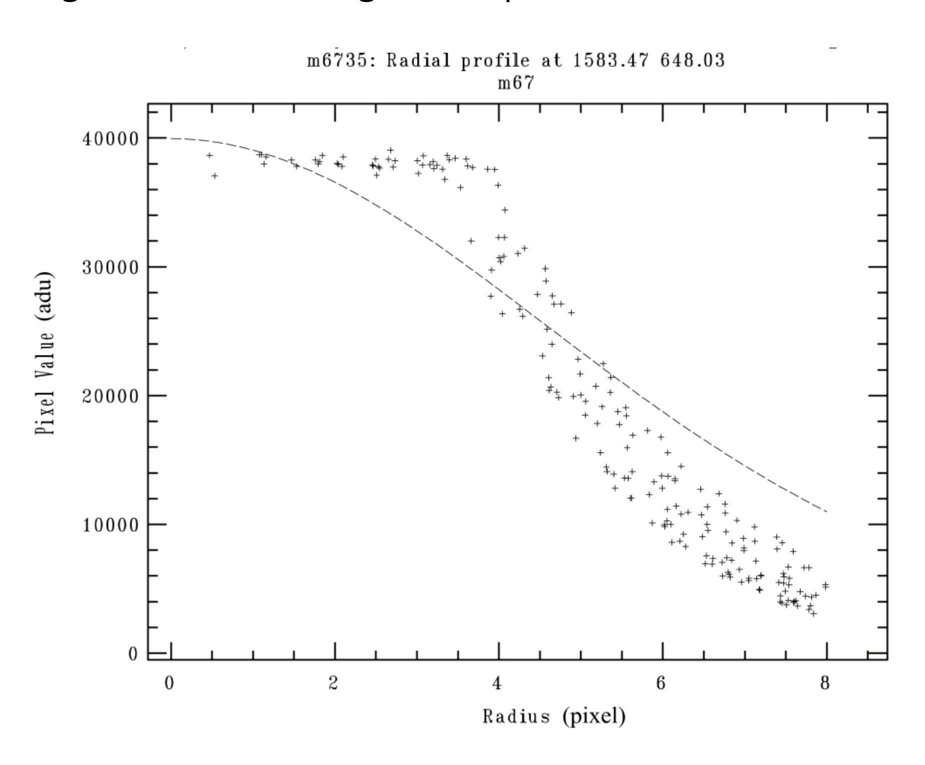


图 6　拍摄的 HD75700 的径向轮廓图

Fig.6　radial profile of the observed HD75700

3 讨论

过早饱和即溢出是本 CCD 相机的弱点，这限制了点光源测光的动态范围，以及进一步使用点扩散函数（Point Spread Function）分析。但如果控制曝光时间，避免亮星过度曝光，仍然可以使用本 CCD 相机对点光源做高精度测光[13]。

本文在使用 CCD 相机进行图像采集时，使用的是基特峰天文台也使用的 MaxImDL 控制程序。为探究使用 MaxImDL 控制程序控制 CCD 相机进行图像采集会出现过早溢出的原因，联系了云南天文台 1m 望远镜的负责人和国家天文台 2.16m 望远镜的观测专家，进行了细致讨论。云南天文台 1m 望远镜使用不同型号的 CCD 相机溢出情况不同，曾经 PI 公司大小为 1024×1024 的 CCD 相机没有过早溢出，但是，后来购进的 ANDOR 公司的 CCD 相机却有过早溢出，经过各种尝试，也没有从根本上解决过早溢出问题。国家天文台 2.16m 望远镜使用 MaxImDL 控制程序，当有过早溢出时，改变 bin 参数，过早溢出会得到改善。本文也曾试着改变参数，但是情况没有改变。在文献中得知当 Massey 等在基特峰天文台处理老的 RCA CCD 相机资料时，有遇到类似情况，他们把这归之于“细微的电荷传递问题”[13]。过早溢出究竟是电荷传递问题还是 CCD 芯片问题或控制程序问题？还需要以后进一步的分析探究。

4 结语

对于在实验中使用的 CCD 等仪器设备，尽管厂家提供了参考的性

能参数，但为了更细致深入了解该仪器设备，仍需要使用者自己测定相关参数。本文的研究测定方法对于新购 CCD 的使用者具有参考性和指导性。本文对南京大学 65cm 反射式望远镜的后端探测器 PIXIS 2048B CCD 相机性能进行了研究和实际测定，得到了 CCD 相机的快门函数、线性、增益和噪声。测得的快门函数已存储于观测用的计算机中，以后的观测中，会在必要时把观测数据和快门修正函数一同给与数据处理者，方便进行修正。这款 CCD 相机的读出值从 0 到 61900 adu，非线性都小于 1%，CCD 相机的增益约 1.02 e^-/adu，读出噪声约 13e^-。在后续的实验教学观测项目以及研究项目观测中，这些测得的性能参数将指导学生和研究者更好地选择合适的观测目标，设置观测中的观测参数，以及后期处理数据的校正，有利于更好地发挥设备性能和进行观测研究。

致谢

非常感谢上海天文台姚保安老师给予的指导和帮助。

参考文献（References）

[1] 路甬祥. 从仰望星空到走向太空--纪念伽利略用望远镜进行天文观测 400 年[J]. 天文学进展，2010，1：1-9

Lu Yong-xiang. From Earth to Space: in Celebrating the 400th Anniversary of the Use of Telescope by Galileo to Study the Universe[J]. Progress in Astronomy,2010, 1：1-9

[2] 赵永恒. 从照相底片到 CCD[J]. 现代物理知识，2019，6: 31-34

Zhao Yong-heng. From photographic negatives to CCDs[J]. Modern Physics,2019, 6：31-34

[3] 黄佑然，许敖敖，唐玉华，等. 实测天体物理学[M]. 北京，科学出版社, 1987.

Huang You-ran，Xu Ao-ao,Tang Yu-hua,et al.Observational Astrophysics[M]. Bei Jing,Science Press, 1987.

[4] 冯海霞, 陈建军, 邓建榕，等. CCD 图像中宇宙线 μ 子甄选技术[J]. 天文研究与技术,

2020，第 17 卷(2):201-209.
Feng Haixia, Chen Jianjun, Deng Jianrong,et al. Cosmic-ray Muons Extraction Technology in CCD Image[J]. Astronomical Research & Technology, 2020, 17(2): 201-209

[5] 林清. 1.56 米望远镜 CCD 线性检测及非线性特征分析[J].紫金山天文台台刊，1997，Vol.16:12-24

Lin Qing. Linearity Analysis of the CCD for the 1.56m Reflector[J]. Publications of Purple Mountain Observatory, 1997, 16：12-24

[6] 姚保安，张春生，林清. 关于云南天文台 Tek1024CCD 的线性及其他[J].紫金山天文台台刊，1998，Vol.17:57-61

Yao Bao-an, Zhang, Chun-sheng, Lin Qing, et al. On the Linearity of the TEK 1024 CCD at Yunnan Observatory[J]. Publications of Purple Mountain Observatory, 1998, 17：57-61

[7] 王海涌，申功勋. 基于电子快门实现 CCD 曝光量无级调节技术[J]. 光电工程, 2006，33(08): 136-139.

Wang Hai-yong，Shen Gong-xun. Technology of stepless adjustment to CCD exposure based on electronic shutter[J]. Opto-Electronic Engineering, 2006,8:136-139

[8] 姚保安.关于 CCD 平场快门效应的改正及有关问题[J].天文学报，1997，Vol.38:312-322

Yao Bao-an, Lin Qing. Some notes on the Shutter-Free Flatfielding for CCD Cameras[J]. Acta Astronomica Sinica，1997，Vol.38:312-322

[9] Yao Bao-an, Wang Shu-he, Tang Zheng-hong. Performance Study of the CCD Camera on the 1m Reflector at NAOC[J]. Annals of Shanghai Observatory Academia Sinica，2007，NO28:80-88

[10] 李相民，周立伟，金伟其. 科学级制冷 CCD 相机的性能与技术[J].大连理工大学学报，1997，S2:15-17

Li Xiang-min, Zhou Li-wei, Jin Wei-qi. Performance and technology for Scientific cooling CCD cameras[J]. Journal of Dalian University of Technology, 1997，S2:15-17

[11] 郭碧峰，彭青玉，尚一佳，等.CCD 图像相对测光中的技术研究与精度回报现象[J]. 天文研究与技术，2022,19（2）：111-117.

Guo Bifeng, Peng Qingyu, Shang Yijia, et al. Technology Research and Precision Premium in Relative Photometry Based on CCD Images[J].Astronomical Research & Technology,2020, 19(2): 111-117.

[12] Yao Bao-an, Zhang Chun-sheng.Shutter Function and Linearity of the New CCD Camera at the 1.56m Reflctor in shao[J]. Annals of Shanghai Observatory Academia Sinica，2003，NO24:71-74

[13] 姚保安，张春生，林清. 电荷守恒与 CCD 孔径测光[J].天文学报，2006，Vol47:111-118

Yao Bao-an, Zhang Chun-sheng,Lin Qing. Charge Conservation and CCD Aperture Photometry[J]. Acta Astronomica Sinica，2006，Vol47:111-118